

ОТЗЫВ

на автореферат Борданова Ильи Алексеевича

«Модели и алгоритмы оценки функциональной корректности искусственных нейронных сетей на базе мемристоров», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Основным направлением развития обработки многофакторной информации значительных объемов для принятия на ее основе решений, а также анализа и генерации текстовой, речевой и аудиовизуальной информации является аппарат искусственных нейронных сетей. Такие сети принципиально обладают свойством параллельной организации вычислительного процесса, что является перспективой существенного ускорения их аппаратной реализации. Благодаря такому свойству относительно небольшие вариации в работе нескольких параллельных ветвей могут не оказывать существенного влияния на качество результата работы всей нейросети. Такой подход активно используется при адаптации нейросети к работе на нейропроцессорах с ограниченными аппаратными ресурсами — удаляются вносящие малый вклад в результат как связи между нейронами, так и сами нейроны.

Существенное, от двух порядков и более, увеличение быстродействия нейропроцессоров возможно при одновременном переходе к аналоговой форме обработки сигналов и вычислениям «в памяти» — совмещении процессорного элемента и памяти в одном микроэлектронном приборе. Однако переход из цифровой области в аналоговую влечет за собой возврат к необходимости учета вариаций таких микроэлектронных приборов, в данном случае кроссбаров на основе мемристоров. В нейропроцессорах количество последних может достигать сотен тысяч экземпляров, что ощутимо влияет на функциональную корректность нейросетей. В рассматриваемой работе предлагаются модели и алгоритмы для такой оценки, что делает ее весьма **актуальной**.

Научная новизна работы заключается в разработке моделей и алгоритмов на трех уровнях взаимодействия нейросети и мемристоров. На низшем уровне предлагается модель статистической взаимосвязи между параметрами управляющих сигналов для мемристора и установившимся в результате их воздействия сопротивлением взамен физических моделей его работы. На следующем уровне предлагается новая модель статистической оценки зависимости веса синапса от параметров мемристора. На верхнем уровне вводится новый алгоритм оценки функциональной корректности нейросетей, определяющий зависимость индивидуальных погрешностей весов от параметров сигналов программирования и ограничений по рабочим напряжениям. В итоге предложенная совокупность моделей и алгоритмов является вкладом в расширение представления об устойчивости различных архитектур нейроморфных систем к вариациям параметров и формируют теоретическую основу для повышения точности моделирования, а также для дальнейшей разработки методов коррекции ошибок, требований к качеству мемристоров и подходов к тестированию нейропроцессоров.

Практическая значимость заключается в возможности применения предлагаемых моделей и алгоритмов для повышения точности моделирования за счет учета параметров работы реальных приборов. Такой подход подтвержден результатами вычислительных и натурных экспериментов, показавших различие между результатами моделирования и аппаратной реализации точность не хуже 3 %, что существенно лучше аналогичного

параметра у существующих методов. Наряду с внедренным в научно-исследовательскую и производственную практику такое решение может быть использовано при разработке новых процессоров со сверхнизким энергопотреблением на мемристорных кроссбарах для носимой электроники и встраиваемых систем.

Полученные результаты моделирования сопротивлений мемристоров и весов синапсов согласуются с экспериментальными данными (достоверность 0,95) и подтверждены на 3-х различных архитектурах нейросетей при решении практических задач; сравнение моделирования с аппаратной реализацией показало расхождение не более 3 % (против до 25 % для существующих методов). Предлагаемые методы и программно-аппаратное обеспечение созданы и использованы в рамках 6-и НИР, результаты доложены и обсуждены на 6-и международных и всероссийских конференциях и опубликованы в 14 научных работах, включая издания ВАК и базы Scopus/Web of Science, а также подтверждены 3-мя свидетельствами о регистрации программ.

Текст автореферата в части языка и стиля изложения выдержан в строгом научном стиле, однако некоторые фрагменты излишне громоздки и могут быть упрощены без потери смысла.

Достоинством работы является установление взаимодействия между физическим и информационным уровнями моделирования реализации нейросетей на мемристорных кроссбарах путем применения предлагаемого статистического подхода, обеспечивающего связь между функциональной корректностью таких нейросетей с параметрами управляющих сигналов, вариаций и ограничений мемристоров. Этот факт усиливается возможностью обратного синтеза параметров мемристоров и наличием предлагаемого аппаратно-программного комплекса для сбора экспериментальных данных, автоматизацию проведения экспериментов и верификацию моделей.

В качестве **недостатков работы** следует отметить следующие.

В автореферате отсутствует анализ статуса и перспектив развития физических моделей, в том числе и *ab initio*. При том, что в работе исследуются нейросети, целесообразно совместить предлагаемое статистическое моделирование на экспериментальных данных, физические модели и предсказательное моделирование с помощью нейросетей. Такой подход позволил бы снизить зависимость от экспериментальных данных, предусмотреть опасные режимы эксплуатации на основе физики работы приборов, а также экстраполировать оценки в более широком диапазоне.

При разработке мемристоров приводят комплексную оценку всех основных потребительских характеристик, в числе которых время удержания, выносливость, скорость переключения, энергопотребление при записи и чтении, многоуровневость, устойчивость к внешним факторам и дрейфу параметров и др. Следует явно указать все параметры, влияющие на функциональную корректность нейросети и пояснить применимость предлагаемого подхода, при необходимости — варианты его усовершенствования.

Ввиду ограниченного размера реальных мемристорных кроссбаров закладывается возможность масштабирования как на уровне кристаллов внутри корпуса (2,5D- и 3D-интеграция), так и на уровне корпусов нейропроцессоров путем объединения их в матрицы. В автореферате не приведен анализ вычислительной сложности предлагаемого подхода и его возможности для оценки масштабируемости измеренного мемристорного кроссбара в таких случаях.

Однако приведенные замечания не снижают научной значимости диссертационной работы.

Диссертационная работа Борданова Ильи Алексеевича представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в котором получены новые научные и прикладные результаты, имеющие значение для развития вычислений реального времени «в памяти» на основе мемристорных кроссбаров.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», а также требованиям пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор — Борданов Илья Алексеевич, — заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Согласие на обработку персональных данных: я даю согласие на обработку моих персональных данных в составе документов, представляемых в диссертационный совет, в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации.

Начальник отдела перспективных исследований АО «НИИМЭ»,
доцент базовой кафедры микро- и наноэлектроники МФТИ, к.т.н.

Тельминов Олег Александрович
«27» 03 2026г.

Подпись Тельминова Олега Александровича удостоверяю:



Луганско М.В.

Полное наименование организации: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники». Адрес: 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1. Тел: +7 495 229 72 99, факс: +7 495 229 77 73, эл. почта: niime@niime.ru, сайт: www.niime.ru